

電気刺激パルスを数える際の「バイナリカウンタ」仮説 (第2報)：機械刺激との比較

“Binary Counter” Hypothesis When Counting Electrical Pulse Stimulation (II): Comparison with Mechanical Stimulation

○ヤェム ヴィボル (電通大) 梶本 裕之 (電通大)

Vibol YEM, The University of Electro-Communications, yem@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications

In the process of repeatedly pressing and releasing the skin with a needle, fast adapting receptors (FA) in the skin are activated during both pressing and releasing. With this consideration, in our study we hypothesize that, when we are presented the tactile sensation by pulses of electrical current, we will interpret two pulses of stimuli as one time of press-release action. In our previous study, this hypothesis was verified in a certain frequency range. This paper investigates whether this phenomenon occurs also in case of mechanical stimulation, in which the skin is pressed and released with a needle. Result shows that, this phenomenon did not occur when subjects clearly perceive the strength of stimuli.

Key Words: Binary counter, mechanical stimulation, electrical stimulation

1. はじめに

ヒトの皮膚には4種類の機械受容器があることが知られている。これらは、Ruffini 終末、Merkel 細胞、Meissner 小体及び Pacinians 小体である[1]。Ruffini 終末と Merkel 細胞は、遅順応型の受容器であり、機械刺激の「変位」と「変位+速度」成分に対し神経活動を生じる。これに対して、Meissner 小体及び Pacinians 小体は速順応型の受容器であり、それぞれ機械刺激の「速度」と「加速度」成分に対し神経活動を生じる。例えば、針で皮膚を押し離すというプロセスの中では、押している間中、Merkel 細胞や Ruffini 終末が活動するが、特に「押す」、「離す」という速度/加速度変化の際に Meissner 小体及び Pacinian 小体が敏感に活動することが知られている。一方で我々は、押すことと離すことを区別せずに、一つの「接触」という事象として解釈する。つまり我々は、「連続した1群のMerkel 細胞や Ruffini 終末の活動」と、「時間的に離れた2群の Meissner 小体や Pacini 小体の活動」を統合して、またはいずれかの情報を、一つの接触という事象として捉えていると考えられる。

では、Meissner 小体や Pacini 小体の活動のみを生じる状況では、時間的に離れた2群の刺激は一回と感じられるのだろうか。感じられるとすればその条件はなんだろうか。

前報では、電気刺激を用いて一定の周波数範囲で検証を行った[2] (図1)。陽極パルスを用いた電気刺激では、圧覚よりも振動感覚を強く生じることが明らかとなっており、Meissner 小体に関連する神経が刺激されていることが示唆されている[3]。このことから Meissner 小体に起因する振動感覚を提示する手段として利用できる。また機械的振動とは異なり電気刺激は刺激と神経活動のタイミングが揃っているため、明瞭に神経活動の振る舞いを設計しやすいという利点がある。前述の「2群」の神経活動という表現は、電気刺激においては2回の刺激による神経活動ということが出来る。以上の考察から、我々は次の仮説を立てた：

「陽極パルスを用いた電気刺激では、2回の刺激パルスが1回の押し-離しと解釈される」。

実験の結果、電気刺激のパルス周期が 60 ms 以下のとき、被験者の知覚する回数は電気刺激パルス数の半分になることを確認できた。しかし、周期が 100 ms 以上の時、この現象は

生じず、提示回数の増加及びリフレッシュ周期の減少につれてカウントの正答率が徐々に減少した。この後半の結果は、Iida ら[4]が機械振動刺激によって得た実験結果と同じ傾向であった。Iida らは機械振動刺激を用いた刺激回数カウントの実験において、刺激(振動群)を2回提示した場合、各刺激間の時間(リフレッシュ周期)に関わらずカウント正答率が最も高かったが、提示回数の増加及びリフレッシュ周期の減少につれてカウントの正答率が徐々に減少することを報告している。なお彼らの研究は、いわゆる「数覚」の触覚バリエーションを発見したものであるが、刺激周期としては 100 ms 以上でのみ行なっている。

本稿では、機械刺激の場合にも電気刺激と同じように上記の「2回の刺激を1回として知覚する」現象が生じるかどうかを調査する。

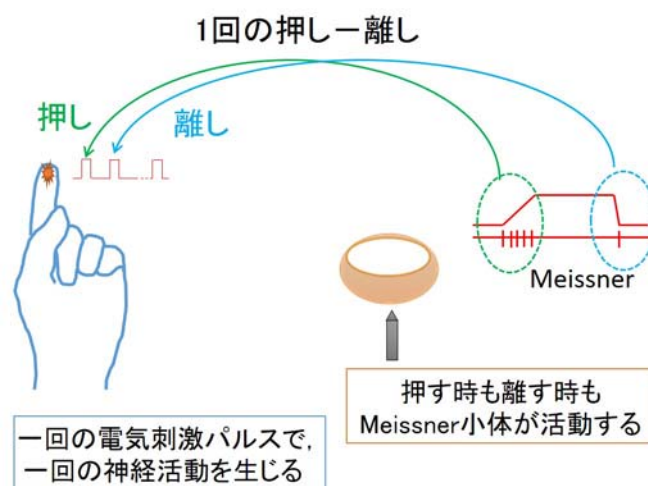


Fig. 1 Interpreting number of electrical-pulse stimuli based on Meissner activation of press-release performance with a needle

2. 実験

2.1 目的

本実験では、機械刺激で提示された回数に対して、被験者に知覚した回数を回答させるとともに、どの程度自信を持って回答したか（確信度）を回答させた。被験者の知覚した回数が、提示したパルスの半分とならなければ、この現象は電気刺激のみで生じる現象であると言える。一方でもし被験者の知覚した回数が、提示したパルスの半分となる条件が存在するならば、機械刺激であっても生じる現象であると言える。

2.1 実験装置

本実験では、機械刺激を提示するために、我々の先行研究[3]で用いた装置と同様のクランク機構を利用した。装置は前後および上下の2自由度方向に触覚提示が可能であるが、本実験では皮膚に垂直な方向の押し-離しのみ提示した。装置はマイクロコントローラ (mbed NXP LPC1768) およびモータドライバ IC (TB6643KQ) により制御される。機械装置の末端には直径1mmのピンが取り付けられており、指先皮膚に押し-離しの触覚を提示する。ピンは直径8mmの穴の空いた板の中央に配置され、この板が指載せ台として機能する。マイクロコントローラとPCの間でSerial通信を行うことで、機械刺激の押し-離しの振幅をPCのキーボードで操作できるようにした。

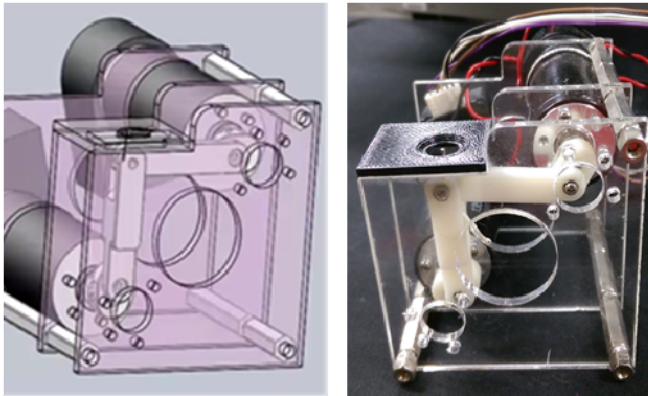


Fig. 2 Crank mechanism for mechanical stimulation

2.2 被験者・手順

被験者は22~28歳の5名（男性4人、女性1人、全員右利き）であった。実験の手順は以下の通りであった。

ピンの動きはサイン波形とし、図3に示すように皮膚とピンの間が離れないよう、オフセットのある波形とした。リフレッシュ周期を $T = \{60, 100, 140\}$ ms の3条件、押し-離しの回数を $N = \{2, 3, 4\}$ 回の3条件、計9条件とした。各条件を一回のみ行ったため、被験者ごとの試行数は9回であった。実験はランダム順で行った。各刺激は被験者が納得して回答するまで1秒の休憩をはさんで繰り返し行われた（図3）。

1試行の実験の中で、刺激の振幅を感覚閾値付近に設定する場合と、明瞭に感じる強さに設定する場合の2つの場合について刺激回数および確信度を回答させた。

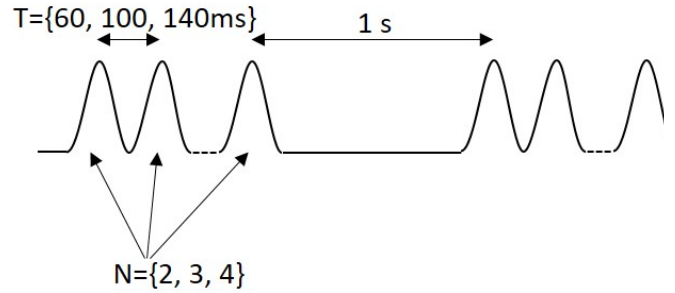


Fig. 3 Press-release waveform of pin for experiment

実験の様子を図4に示す。実験の手順は以下のとおりである。

- ① 図4に示すように、被験者に実験装置の前に椅子の上に座らせ、姿勢を安定させるために腕を机に置くように伝えた。また、人差し指を軽くピンの上に置くようにさせた。
- ② 各周期において、押し-離しを連続的に与え、押し-離し触覚を知覚し始まる感覚閾値、および明確に知覚できる強度をキーボード操作による振幅調整によって回答させた。
- ③ 前ステップで得られた感覚閾値の振幅、および明確に知覚できる強度の振幅において、押し-離しの刺激をしている際の刺激回数をカウントさせ、カウントした回数と5段階の自信度（1：まったく自信がない、5：自信がある）を回答させた。

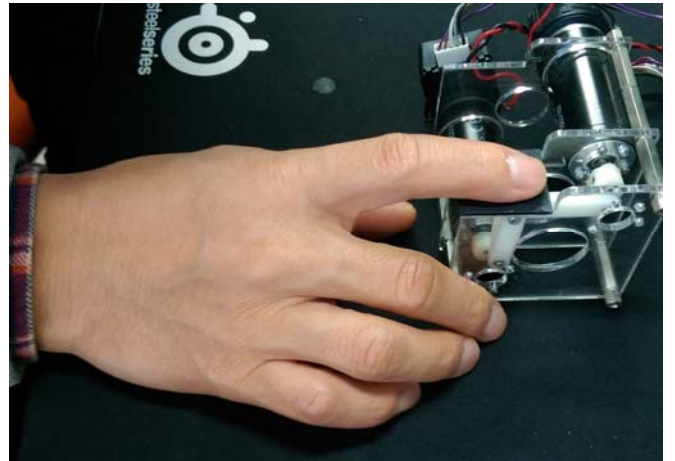


Fig. 4 Overview of experiment

2.3 結果

各リフレッシュ周期及び各押し-離し数において、被験者が知覚した刺激回数を図5と6に示す。図5は感覚閾値付近での振幅条件、図6は明瞭に知覚できる振幅条件である。図の横軸は実際の押し-離し回数を、縦軸はカウント数と刺激回数の比率を表す。例えば4回刺激して4とカウントした場合にはこの数値は1となる。また4回刺激して2とカウントした場合にはこの数値は0.5となる。各条件における被験者の自信度の平均値の比較を図7に示した。図のエラーバーは標準偏差である。今回は予備的な結果のため統計的な処理は行っていない。

3. 考察

実験の結果、2つの振幅条件のいずれにおいても、リフレッシュ周期が短く又は提示回数が多くなるほど、知覚する刺激回数が減少することが分かった。感覚閾値付近の振幅条件(図5)において、提示周期が60msと100msの場合には、提示回数を実際の半分と回答する傾向が見られた。これは前報で行った電気刺激実験の場合と似ているように思われる。しかし一方で、刺激を明瞭に知覚できる条件の場合には(図6)この現象は生じず、先述のIidaらの研究と同様、刺激回数が2回の場合にはカウント数と刺激数が一致し、刺激回数が増えるに連れてカウント数が減るという結果となった。

前報で行った電気刺激を用いた実験では、電気刺激の強度を知覚閾値と痛覚閾値の平均値としたため、被験者は刺激を明瞭に知覚できる条件であった。つまり、電気刺激では「明瞭に知覚出来る状況において2パルスを1回とカウントする」現象が確認されていたのに対して、今回の機械刺激においては、「明瞭に知覚できる条件においてはこの現象は生じないこと」「知覚閾値の条件では類似の現象が生じること」が明らかとなった。つまり「2回を一回に感じる」という現象は、電気刺激によってより頑健に生じる現象であることが明らかとなった。

機械刺激において、明瞭に知覚できる強度の条件では2回を1回とカウントする現象が生じなかった理由としては、機械刺激の場合、Meissner小体以外に、Merkel細胞等も活動するため、関与する受容器の種類が異なっていたことが原因の一つとして考えられる。また、電気刺激の場合には刺激パルスと神経活動は高い時間精度で同期していることが知られているが、今回の機械刺激の場合には正弦波を用いているため受容器活動の同期性は低いと考えられ、これも結果の違いに繋がった可能性も考えられる。つまり機械刺激であっても、インパルス状の刺激であればより明確に2回を一回と感じる減少が生じる可能性は残されている。

図7を見ると、もっとも短い周期 $T = 60 \text{ ms}$ の時、両刺激強度の条件において確信度は低かった。周期 $T = 100 \text{ ms}$ と 140 ms の時、刺激を明瞭に知覚する振幅条件の方が確信度が高かった。これらは自然な結果と思われる。一方で多くの被験者が「ある刺激の全体の時間幅が他の刺激より短く又は長く感じると確信度が下がる」というコメントをした。例えば、1回刺激されていると感じても、その刺激が前回の試行の刺激より刺激時間が長いと感じると刺激が2回かもしれないと思ってしまった、ということである。これをうけて今後の実験では、刺激時間が一定ではないと被験者に伝える必要があると考えられる。

4. おわりに

本研究は、電気刺激によって触覚が提示される際、2回のパルスがそれぞれ皮膚の押し-離しの運動と解釈されることによって知覚される刺激回数が半分になる、という仮説を検証するものである。前報ではある周波数において2パルス刺激を1回提示されると感じる現象を確認したのに対し、本稿では、機械刺激の場合にもこの現象が生じるか調査した。実験の結果、電気刺激の場合と異なり、刺激を明瞭に感じられる強度では2回の刺激を1回と知覚する現象は生じなかった。一方で感覚閾値付近の振幅では2回の刺激を1回と知覚する条件があり、それは電気刺激の場合と同様の刺激周期であった。

今後は、機械刺激の波形の影響を調べるとともに、この触覚的な数覚特性をより深く検討する予定である。

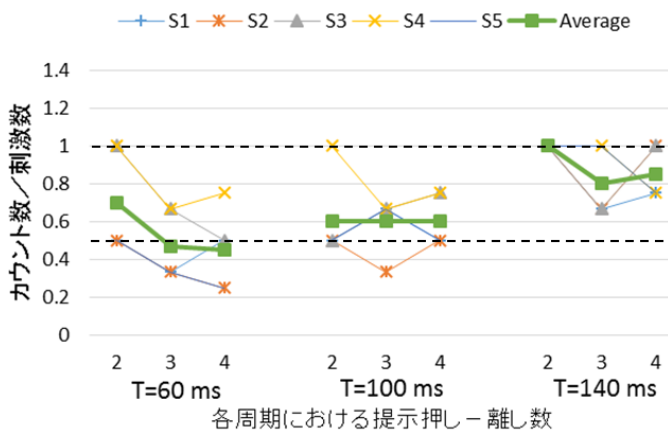


Fig. 5 Proportional of perceived number to stimuli number of each participant for the condition of press-release threshold presentation

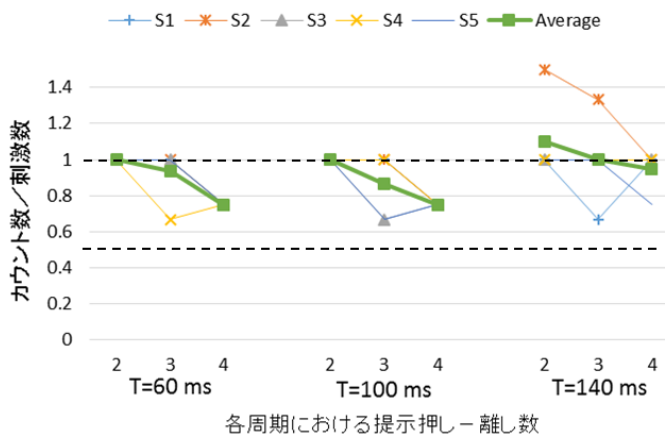


Fig. 6 Proportional of perceived number to stimuli number of each participant for the condition that participants can clearly perceive press-release sensation

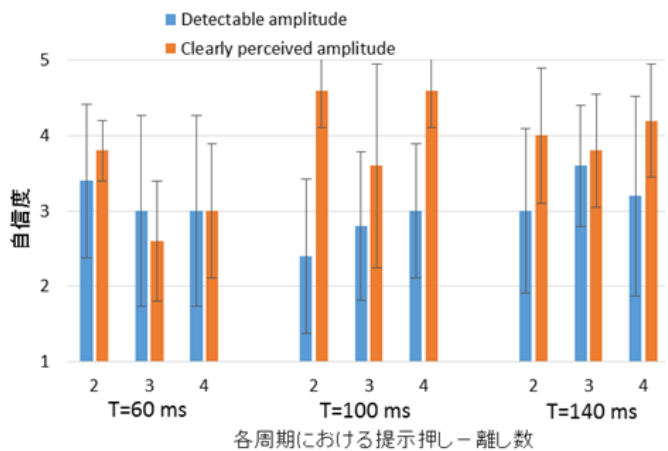


Fig. 7 Confident scores that participants feel each of their answers was correct

謝辞

本研究は JST-ACCEL 「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた。

参考文献

- [1] L.A Jones and S.J Lederman, "Human Hand Function." *1st ed. USA: Oxford Uniernity Press*, 2006.
- [2] ヤエムヴィボル, 梶本裕之, “電気刺激パルスを数える際の「バイナリカウンタ」仮説 (第1報)”, 第17回 公益社団法人 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門 講演会,(2016年12月,札幌コンベンションセンター), 2016.
- [3] V. Yem, H. Kajimoto, "Comparative Evaluation of Tactile Sensation by Electrical and Mechanical Stimulation." *IEEE Trans. on Haptics (Accepted)*
- [4] N. Iida, S. Kuroki and J. Watanabe, “Comparison of Tactile Temporal Numerosity Judgments Between Unimanual and Bimanual Presentations.” *Trans. Perception*, Vol. 45, No. 1-2, pp. 99-113, 2016.